Aus der Medizinischen Klinik der Universität Bern
(Direktor: Prof. Dr. W. Frey)

Untersuchungen über die Physiologie der Gasmaskenatmung und deren Verbesserung

INAUGURAL-DISSERTATION

zur
Erlangung der Würde eines Doctor medicinae
der
Universität Bern

vorgelegt von

PAUL STUCKY
(von Oberurnen Kt. Glarus)

Zürich 1942

Buchdruckerei Fluntern, Plattenstraße 27

Aus der Medizinischen Klinik der Universität Bern
(Direktor: Prof. Dr. W. Frey)

Untersuchungen über die Physiologie der Gasmaskenatmung und deren Verbesserung

INAUGURAL-DISSERTATION

zur
Erlangung der Würde eines Doctor medicinae
der
Universität Bern

vorgelegt von

PAUL STUCKY
(von Oberurnen Kt. Glarus)

Zürich 1942

Buchdruckerei Fluntern, Plattenstraße 27

Auf Antrag des Herrn Prof. Dr. W. Frey von der medizinischen Fakultät zum Druck als Dissertation genehmigt.

Bern, den 25. November 1942.

Der Dekan der Med. Fakultät:

Prof. Dr. A. v. Muralt

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Dem Direktor der Med. Klinik, Herrn Prof. Dr. Frey und dessen Oberarzt, Herrn P. D. Dr. Martin Gukelberger, sei an dieser Stelle für die sehr wertvolle, tatkräftige Unterstützung bei dieser Arbeit bestens gedankt.

Untersuchungen über die Physiologie der Gasmaskenatmung und deren Verbesserung.

Einleitung.

Die mit dem heutigen Krieg verbundenen Verhältnisse haben die Gasmaske zum Hausgerät eines jeden Zivilisten werden lassen. Der Staat sorgt durch die Schaffung von speziellen Gaslaboratorien, daß unsere Maskentypen auch wirklich den neuesten Errungenschaften auf diesem Gebiete entsprechen und seinen Bürgern Schutz vor den todbringenden Giftgasen gewähren. Bei dieser Situation muß es aber verwundern, daß von gleicher Seite nicht die geringsten Anstrengungen gemacht worden sind, die physiologische Seite der Gasmaskenatmung abzuklären. Wir wissen heute genau Bescheid über die Dauer der Brauchbarkeit der verschiedenen Filter. Es ist aber keineswegs klar, ob ein so langes Tragen der Maske überhaupt möglich ist und welche Anforderungen es an den Organismus stellt. Mit der Tatsache, daß ein Gesunder die Gasmaske während längerer Zeit tragen kann, ist noch kein Werturteil verbunden, und die Frage, ob unsere Maskentypen sich für Gesunde und Kranke, Erwachsene und Kinder eignen, ist dadurch auch nicht gelöst.

Hier setzen unsere Untersuchungen ein. Sie bezwecken, die Physiologie der Gasmaskenatmung näher abzuklären, um eventuell auf Grund der Ergebnisse Verbesserungen vorschlagen zu können.

Wenn man sich mit der Maskenatmung ganz allgemein befaßt, so spielen hier 2 Faktoren eine große Rolle, nämlich der schädliche Raum und die Funktion der Atmungsventile. Funktionieren die Ventile tadellos, so ist der schädliche Raum durch die Funktion der Maske eindeutig definiert und kann gemessen werden. Im gegenteiligen Falle wird er zu einer nicht genau bestimmbaren funktionellen Größe (primärer + sekundärer schädlicher Raum). Neben diesen Faktoren tritt bei der Gasmaske im speziellen noch der Filterwiderstand in Erscheinung. Bei dieser Sachlage stellen sich folgende atemphysiologische Fragen:

1. Bleiben die Sauerstoffaufnahme und die Kohlensäureabgabe durch die Gasmaskenatmung unbeeinflußt oder zeigen sich die Folgen eines zu großen schädlichen Raumes?

2. Beruht der eventuell vorhandene Raum auf einer falschen Konstruktion der Maske oder auf einer mangelhaften Ventilfunktion? Um aber diese Fragen lösen zu können, müssen bestimmte methodische Bedingungen erfüllt sein, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

Methodik.

1. Die Prüfung der physiologischen Verhältnisse der Gasmaskenatmung verlangt vorerst einmal die Feststellung des Sauerstoffverbrauches, der Kohlensäureausscheidung, der Atemfrequenz und des Atemvolumens, damit über den Gaswechsel, den respiratorischen Quotienten und die Atemökonomie (Atemäquivalent für O_2 und CO_2) etwas ausgesagt werden kann. Diese Größen lassen sich sonst mit Hilfe des Knippingschen Kreislaufstoffwechselapparates ohne weiteres bestimmen, und wir trachteten danach, diesen Apparat auch für die vorliegenden Untersuchungen zu benützen. Dies gelang uns schließlich, indem wir die Gasmaske als Nebenschluß in das Kreislaufgerät einschalteten. Das Schema der Versuchsanordnung ist in Figur 1 dargestellt. Dies war jedoch an gewisse Voraussetzungen gebunden. Einerseits mußte die Maske in ge-

eigneter Weise umgebaut werden, damit die Atmungsluft verlustfrei in den Knippingschen Apparat gelangen konnte. Andererseits war das Maskenfilter in der Weise anzubringen, daß die durch das Filter gesogene Einatmungsluft ebenfalls ausschließlich aus dem Knippingschen Apparat zuströmte.

Die ausgeführten Veränderungen an Maske und Filter sind in Fig. 2, 3 und 4 dargestellt. Daraus ersehen wir, daß die Einrichtung bei der Zivilmaske weit einfacher ausfällt, weil im ersten Falle das Filter an die Maske geschraubt ist. Im 2. Falle mußte das Filter mit einer spirometerartigen Blechglocke versehen werden und wurde über einen im Wasserbad stehenden Glasbehälter gestülpt. Der Wassermantel und die Blechglocke verhinderten, daß Luft von außen Zutritt finden konnte; ein im Blecheinsatz unmittelbar neben dem Filterrand angebrachter Stutzen stellte die Verbindung zwischen Glasbehälter und Außenluft bezw. dem Zuführungsschlauch aus dem Knippingschen Apparat her. Durch 2 Schalthahnen (siehe Schema) war dafür gesorgt, daß die Versuchsperson genau gleich wie beim Stoffwechselversuch zuerst Außenluft atmete und erst im geeigneten Moment an den Knipping eingeschaltet werden konnte.

2. Die Prüfung der Ventilfunktion geschah in doppelter Weise. Einmal wurde mit Hilfe des Fleisch'schen Pneumotachographen festgestellt, ob sich vor dem Einatmungsventil, bezw. dem Ausatmungsventil eine in umgekehrter Richtung ablaufende Luftströmung während der entsprechenden Phase des Ventilschlusses vorfindet. Da, wie wir später sehen werden, diese für das Einatmungsventil zutraf, mußte diese Fehlleistung des Ventils gemessen werden. Dies gelang unter Einschalten einer feuchten Gasuhr als Seitenweg zwischen Filter und Gasmaske unter Verwendung entsprechend geschalteter Krogh'scher Ventile. In Fig. 5 ist die Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Daraus ist leicht zu ersehen, daß die durch den mangelhaften Schluß des Einatmungsventils während der Ausatmungsphase in den Einatmungsweg zurückströmende Luft in die Gasuhr gelangt und von ihr registriert wird.

Ergebnisse.

A. Gaswechselverhältnisse.

In Tab. 1 sind die diesbezüglichen Ergebnisse bei freier Atmung, der Atmung mit der Zivilgasmaske (Z) und der Atmung mit der Armeegasmaske niedergelegt. Dabei zeigen sich hinsichtlich der Sauerstoffaufnahme keine Gesetzmäßigkeiten, hingegen erweist sich die Kohlensäureausscheidung in 5 von 6 Fällen vor allem bei der Atmung mit der Armeegasmaske als verschlechtert. Entsprechend dieser Tatsache verhält sich auch der respirator. Quotient, indem bei der Atmung mit Z. und A. geringere Werte festzustellen sind. Die Atemfrequenz verhält sich regellos, im Gegensatz zum Atemvolumen, das bei A. stets die größten, bei Z. in der Mehrzahl der Fälle die zweitgrößten Werte erreicht. Die Steigerung gegenüber der Norm beträgt bei A. im Durchschnitt 35 %, erreicht aber Maximalwerte bis 60 %. Deutliche Unterschiede kommen beim Atemminutenvolumen vor. So sind die Gasmaskenwerte (A. und Z.) mit einer einzigen Ausnahme stets gegenüber der Norm erhöht, wobei die höchsten Werte in der Mehrzahl der Fälle bei A. zu finden sind.

Besonders interessant ist das Verhalten der Atemäquivalente für O_2 und CO_2. Wir verstehen darunter diejenige Anzahl Liter von Ein- bezw. Ausatmungsluft, die notwendig sind, damit 100 ccm Sauerstoff bezw. Kohlensäure vom Blut aufgenommen resp. aus dem Blut entfernt werden. Diese Zahl ist somit ein Maß für die Oekonomie des Gaswechsels. Kleine Zahlen bedeuten eine ökonomische, große Werte dagegen eine unökonomische Atmungstätigkeit. Betrachten wir nun die beiden Kolonnen, so ergibt sich eindeutig ein Ansteigen der Werte bei der Gasmaskenatmung. Dabei finden wir bei der Armeemaske fast immer die größten Werte. Dies gilt deutlicher und intensiver für das Atemäquivalent der CO_2, so daß man zur Annahme gezwungen ist, die Bedingungen für die Kohlensäureausscheidung seien vor allem bei der Gasmaskenatmung verschlechtert. Dies würde sehr gut zu den oben erwähnten Veränderungen der CO_2-ausscheidung, des R. Q., des Atemminutenvolumens und des Atemvolumens passen.

Tabelle 1. Das Verhalten der verschiedenen Atmungsgrößen bei freier Atmung (F), bei der Atmung in der Zivilmaske (Z) und in der Armeegasmaske (A).

Versuchspersonen		Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6
Sauerstoffverbrauch in ccm/Min	F	329	409	279	273	381	315
	Z	340	448	279	454	374	336
	A	294	465	296	305	378	266
Kohlensäureausscheidung in ccm/Min.	F	346	382	255	308	365	301
	Z	297	379	281	329	287	273
	A	321	364	231	305	294	262
Respirator Quotient	F	1,1	0,93	1,15	1,25	0,96	0,89
	Z	0,81	0,85	1,01	0,72	0,77	0,81
	A	1,09	0,78	0,78	0,88	0,78	0,99
Atemminutenvolumen in ccm	F	9660	8040	8200	7920	8520	6120
	Z	11500	12990	7650	8820	10750	8360
	A	10550	12600	10300	13600	13120	10500
Atemvolumen in ccm	F	508	618	372	495	532	408
	Z	480	764	332	630	566	587
	A	704	900	430	908	591	803
Atemfrequenz	F	19	13	22	16	16	15
	Z	24	17	23	14	19	14
	A	15	14	24	15	19	13
Atemäquivalent für die Sauerstoffaufnahme	F	2,91	1,96	2,94	2,90	2,23	1,94
	Z	3,35	2,90	2,74	1,94	2,88	2,49
	A	3,59	2,71	3,48	3,05	3,47	3,95
Atemäquivalent für die Kohlensäureausscheidung	F	2,65	2,10	2,55	2,57	2,33	2,03
	Z	4,13	3,43	2,81	2,68	3,75	3,06
	A	3,59	3,47	4,46	4,46	4,47	4,01

Um aber in dieser Hinsicht weiter zu kommen, haben wir eine weitere Versuchsserie angestellt. Hier wurden die normale freie Atmung (F) mit der Atmung in der Armeegasmaske und zwar einmal ohne (A-Fi) und einmal mit dem Filter (A+Fi) verglichen. Dabei wurde bei jeder Versuchsart unter Sauerstoff- sowie Luftzufuhr geatmet. Es sollte damit eruiert werden, ob die erwähnten Vergrößerungen des Atemvolumens und des Atemminutenvolumens teilweise auf einem Sauerstoffmangel beruhen und nicht allein durch die verschlechterte CO_2-ausscheidungsmöglichkeit erklärt werden können. Andrerseits interessiert uns die Frage, wie weit ein gestörter Ventilmechanismus oder wie weit der primäre schädliche Raum der Maske für diese schlechten atemökonomischen Verhältnisse verantwortlich gemacht werden können.

Bei der Betrachtung der Verhältnisse (Tab. 2) fällt ohne weiteres auf, daß zwischen der Sauerstoff- und Luftatmung bei keiner Atemgröße irgendwelche gesetzmäßigen Unterschiede festgestellt werden können. Die vorhandenen Unterschiede entsprechen eben den unter Nichtgrundumsatzbedingungen zu erwartenden Verhältnissen. Ein Sauerstoffmangel kann somit bei der Gasmaskenatmung keineswegs vorliegen, sondern es ist offenbar allein die verminderte CO_2-ausscheidungsmöglichkeit, die sich hier auswirkt. Die 2. Versuchsreihe bestätigt denn auch die in der ersten Versuchsserie gemachten Erfahrungen. So ist für den O_2-verbrauch absolut keine Gesetzmäßigkeit festzustellen. Hingegen zeigen die Mittelwerte der CO_2-ausscheidung wieder eine gewisse Tendenz zur Verminderung bei der Gasmaskenatmung. Die gleiche Tendenz ist auch beim R. Q. in der Mehrzahl der Fälle anzutreffen. Ganz gesetzmäßig aber im umgekehrten Sinne verändern sich das Atemminutenvolumen und das Atemvolumen, während sich die Atemfrequenz ganz unregelmäßig verhält. Die Atemäquivalente verhalten sich genau gleich wie bei der ersten Versuchsserie, indem wir ein allgemeines Ansteigen der Werte bei der Gasmaskenatmung antreffen. Die größten Werte sind vorwiegend bei der Gasmaskenatmung + Filter anzutreffen. Dabei sind die Unterschiede zwischen den Werten für die normale freie Atmung (F) und der Gasmaskenatmung (A—Fi bezw. A+Fi) beim Atemäquivalent für CO_2 viel größer als bei den entsprechenden Verhältnissen für den

Tabelle 2. Das Verhalten der verschiedenen Atmungsgrößen bei freier Atmung, bei der Atmung in der Armeegasmaske ohne Filter und mit Filter unter besonderer Berücksichtigung des Sauerstoffgehaltes der Einatmungsluft (Luft- oder Sauerstoffatmung).

Versuchspersonen			Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4		Fall 5	
Sauerstoffverbrauch in ccm/Min.	F.	O. A.	211	218	255	229	334	318	261	240	292	299
		L. A.	225		202		302		219		306	
	A—Fi	O. A.	311	237	281	277	331	336	341	290	341	341
		L. A.	264		273		341		345		345	
	A+Fi	O. A.	285	270	288	281	327	331	237	228	335	331
		L. A.	254		273		334		219		331	
Kohlensäure-ausscheidung in ccm/Min.	F.	O. A.	291	276	253	233	241	237	279	275	278	270
		L. A.	260		213		232		270		261	
	A—Fi	O. A.	232	227	235	210	255	255	229	239	261	271
		L. A.	221		184		254		268		284	
	A+Fi	O. A.	171	203	193	213	251	254	257	266	188	209
		L. A.	231		232		256		174		230	
Respiratorischer Quotient	F.	O. A.	1,38	1,27	0,99	1,02	0,72	0,76	1,01	1,12	0,95	0,90
		L. A.	1,15		1,05		0,77		1,23		0,85	
	A—Fi	O. A.	0,75	0,80	0,84	0,76	0,77	0,76	0,82	0,86	0,77	0,80
		L. A.	0,84		0,67		0,74		0,89		0,83	
	A+Fi	O. A.	0,61	0,75	0,67	0,76	0,80	0,79	1,08	0,94	0,56	0,63
		L. A.	0,91		0,85		0,77		0,79		0,69	
Atemminuten-volumen in ccm	F.	O. A.	6530	6540	8180	8280	5490	5725	7100	6730	6330	6535
		L. A.	6550		8380		5940		6360		6740	
	A—Fi	O. A.	8500	8410	11400	10475	8080	8850	8220	8300	7520	8650
		L. A.	8320		9500		8620		8380		9780	
	A+Fi	O. A.	9300	10250	12000	12850	8700	8180	12420	11035	9320	9075
		L. A.	11200		13700		7660		9650		8830	

Tabelle 2 (Fortsetzung). Legende: F. = freie Atmung
A — Fi = Atmung in der Armeemaske ohne Filter
A + Fi = Atmung in der Armeemaske mit Filter
O. A. = Sauerstoffatmung
O. L. = Luftatmung

Versuchspersonen			Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4		Fall 5	
Atemfrequenz	F.	O. A.	14	14,5	16	16	18	16,5	13	13	22	22,5
		L. A.	15		16		15		13		23	
	A — Fi	O. A.	15	14,5	31	29	18	18,5	14	12,5	23	24,5
		L. A.	14		27		19		11		26	
	A + Fi	O. A.	15	15,5	23	24	16	16	16	14,5	27	25,0
		L. A.	16		25		16		13		23	
Atemvolumen in ccm	F.	O. A.	467	446,5	510	515	305	350	546	517	288	291
		L. A.	436		520		395		488		294	
	A — Fi	O. A.	567	581	370	361	450	453	587	676	327	354
		L. A.	595		352		455		762		375	
	A + Fi	O. A.	620	660	522	535	542	509	778	760	346	365
		L. A.	700		548		475		742		384	
Atemäquivalent für Sauerstoffaufnahme	F.	O. A.	2,72	2,64	2,84	3,24	1,44	1,59	2,37	2,45	1,88	1,90
		L. A.	2,56		3,64		1,73		2,52		1,91	
	A — Fi	O. A.	2,41	2,59	3,58	3,33	2,15	2,10	2,57	2,51	1,91	2,19
		L. A.	2,76		3,05		2,05		2,44		2,46	
	A + Fi	O. A	2,87	3,38	3,66	4,03	2,37	2,19	4,58	4,21	2,43	2,38
		L. A.	3,88		4,40		2,01		3,83		2,32	
Atemäquivalent für Kohlensäureabgabe	F.	O. A.	2,16	2,19	2,35	2,94	2,00	2,13	2,24	2,14	1,98	2,12
		L. A.	2,21		3,50		2,25		2,04		2,25	
	A — Fi	O. A.	3,23	3,27	4,29	4,31	2,78	2,88	3,14	2,99	2,57	2,89
		L. A.	3,31		4,52		2,98		2,73		3,00	
	A + Fi	O. A.	4,69	4,27	5,46	5,42	2,93	2,78	4,20	4,51	4,32	3,83
		L. A.	4,25		5,18		2,63		4,82		3,34	

Sauerstoff. Auch daraus läßt es sich ableiten, daß es die CO_2-anreicherung in der Maskenluft (schädlicher Raum der Maske) ist, die diese schlechte Oekonomie der Atmung bedingt. Interessant ist ferner die Tatsache, daß die Gasmaskenatmung ohne Filter ebenfalls mit schlechter Atemökonomie einhergeht, wenn auch etwas weniger ausgeprägt als mit dem Filter und daß somit dem Filter in dieser Frage keine ausschließliche Bedeutung zukommt. Es ist dagegen wohl in der Lage, die durch die Maske (schädlicher Raum) gegebenen Verhältnisse zu verschlechtern.

B. Prüfung der Ventilfunktion.

Wenn man sich nach diesen Ergebnissen den durch die Konstruktion der Maske bedingten schädlichen Raum (primärer schädl. Raum) näher betrachtet, so kann man nicht verstehen, daß sich diese 60 70 ccm derart ungünstig auswirken sollen. Hier muß ein schlechtes Funktionieren des Einatmungsventils vorliegen, wobei ein Teil der Ausatmungsluft wieder in den Einatmungsweg gelangt. Das Ausatmungsventil fällt außer Betracht, weil hier ein schlechtes Funktionieren sich nur so auswirken würde, daß während der Einatmungsphase Luft durch das Ausatmungsventil angesogen würde. Dies kann sich atemphysiologisch unter normalen Umständen nicht ungünstig auswirken, bei Vorhandensein von Kampfgasen dagegen zur direkten Vergiftung des Maskenträgers führen. Dieser Gefahr ist aber in der Weise begegnet worden, daß die Ausatmung durch das Ausatmungsventil nur nach Ueberwindung eines Federwiderstandes erfolgt, wobei sich das Ventil sofort nach Beendigung dieser Atemphase wieder schließt. Beim Einatmungsventil fehlt aber ein solcher Federwiderstand und als einzige Kräfte wirken hier Atemdruckkräfte. Wir haben zur Prüfung dieses Problems ein Pneumotachogramm der Luftströmungen im Einatmungsweg der Zivil- und der Armeemaske aufgenommen. Dabei kam der Pneumotachograph bei der Zivilmaske vor das Filter, bei der Armeemaske zwischen Filter und Maske zu liegen. In Fig. 6 ist die aufgenommene Kurve festgehalten. Die Versuchsperson befand sich dabei in

liegender Position und atmete ruhig. Es zeigt sich nun bei der Atmung in der Zivilmaske (Z) eine doppelsinnige Kurve. Der Hauptausschlag führt nach oben und entspricht dem Einatmungsstrom. Im Beginn der Exspiration kommt es dagegen zu einer gegensinnigen Zacke als Zeichen dafür, daß das Einatmungsventil nicht sofort schließt. Bei der Atmung in der Armeemaske sind die Verhältnisse weit schlimmer, weil es während der ganzen Exspirationszeit als Ausdruck des ungenügenden Ventilschlusses zu einer verkehrten Luftströmung kommt. In Figur 7 werden nun die Verhältnisse bei der Armeemaske ohne und mit eingeschaltetem Filter dargestellt. Auch hier macht sich der ungenügende Ventilschluß bemerkbar und zwar im besonderen bei der Gasmaskenatmung + Filter. Das Filter verstärkt somit das fehlerhafte Funktionieren des Einatmungsventils ganz erheblich. Die früheren Ergebnisse (Tab. 1 und 2) stimmen damit gut überein. Auch dort ergaben sich für die Armeemaske die schlechteren Verhältnisse als für die Zivilmaske, und bei der Armeemaske ohne Filter die besseren als bei eingeschaltetem Filter. Damit ist auch eindeutig bewiesen, daß die schlechte Atemökonomie der Ausdruck der schlechten Funktion des Einatmungsventils darstellt. Zum Glück stellt sich diese schlechte Atemökonomie nur unter gewissen Umständen ein, nämlich in liegender Position. Figur 8 gibt darüber klar Auskunft. Es lassen sich dabei 3 Kurvenabschnitte A, B, C voneinander unterscheiden. Bei A war der Kopf leicht nach vorn geneigt, sodaß die Axe des Einatmungsventils stark nach vorn unten schaute. Bei B wurde der Kopf der Versuchsperson leicht nach hinten gehalten, wodurch die Ventilaxe beinahe in die Horizontale zu liegen kam. Bei C wurde der Kopf entsprechend der Kopfhaltung im Liegen möglichst weit nach hinten gehalten, sodaß die Ventilaxe schräg nach aufwärts gerichtet war. Diese 3 Versuchsanordnungen unterscheiden sich auch auf der Kurve recht deutlich durch das verschiedene Verhalten der Ausschläge in der Exspirationsphase. So sehen wir bei A in der Exspirationszeit nur eine Gerade in der Nullinie als Zeichen dafür, daß in dieser Position das Einatmungsventil gut schließt. Bei B besteht dagegen im Beginn der Ausatmungsperiode ein Ausschlag nach unten,

d. h., das Einatmungsventil schließt zu Anfang der Exspirationsperiode ungenügend. Bei C sind nun die Verhältnisse ganz bedenklich. Hier besteht während der ganzen Ausatmungsperiode ein Luftstrom in umgekehrter Richtung.

Die liegende Position, die normale Ruhelage auf dem Rükken, ist also mit der schlechtesten Ventilfunktion und damit mit den schlechtesten atemökonomischen Verhältnissen verbunden.

Dies gilt allerdings nur bei ruhiger Atmung. Sobald stark geatmet wird, ist die Ventilfunktion auch in dieser Lage besser (Fig. 9). Daraus ergeben sich auch die Forderungen, die zu einer Verbesserung der Verhältnisse führen müssen. Wenn nämlich der Ventilschluß hauptsächlich in liegender Position bei Ruheatmung schlecht ist, so handelt es sich offenbar um ein Ventilscheibchen, dessen Gewicht zu groß ist. Der im Liegen bei Ruheatmung in der Maske vorhandene Ueberdruck (Exspirationsdruck) genügt offenbar nicht, um das Ventilscheibchen gegen sein Gewicht auf seine Unterlage anzupressen. Bei starker Atmung ist dies wohl möglich, weil dann der Exspirationsdruck entsprechend höher steht. In sitzender Position, d. h., bei stark nach unten gerichteter Ventilaxe ist selbst bei Ruheatmung ein gutes Funktionieren des Einatmungsventils möglich, weil sich dann zum geringen Druck (Atemdruck) das Gewicht des Ventilscheibchens summiert. Aus diesen Erörterungen läßt sich der Schluß ziehen, daß durch die Wahl eines leichteren Ventilscheibchens die Funktion des Einatmungsventils verbessert, eventuell sogar einwandfrei gestaltet werden kann.

C. Versuche mit leichten Ventilscheibchen.

Das Gewicht des Ordonnanzventilscheibchens beträgt 0,9 bis 0,99 g. Um uns ein Bild über das zu postulierende Gewicht des idealfunktionierenden Ventilscheibchens machen zu können, stellten wir aus verschieden dünnem Karton Modellscheibchen her. Dabei zeigte sich, daß bei einem Gewicht von bis zu 0,3 Gramm das Ventilplättchen auch bei ruhiger

Atmung im Liegen ideal funktionierte (Fig. 10). Die Schwierigkeit bestand nur darin, ein dem Kunstharzscheibchen hinsichtlich Formbeständigkeit ebenbürtiges, aber viel leichteres Scheibchen herzustellen. Dies gelang uns schließlich unter Anwendung von Glimmer als Ausgangsmaterial. Wir erhielten damit ein Scheibchen von 0,44 g. Das Idealgewicht war somit noch nicht erreicht, aber wir gelangten doch mit einem form- und temperaturbeständigen und feuchtigkeitsunempfindlichen Material recht nahe heran.

Mit diesem Ventilplättchen haben wir nochmals eine Versuchsserie von Gaswechseluntersuchungen vorgenommen, die in Tab. 3 zusammengestellt sind. Es handelt sich dabei um Untersuchungen bei freier Atmung (F), bei der Armeemaske inkl. Filter, die dem neuen leichten Ventilscheibchen ausgestattet worden war (A+Gli) und schließlich mit der ordonnanzmäßig ausgerüsteten Armeemaske (A. o.). Dabei zeigte sich, daß sich die Gaswechselverhältnisse der Armeemaske durch das Glimmerscheibchen weitgehend verbessern lassen. Wir finden wohl noch eine leichte Steigerung des Atemvolumens und des Atemminutenvolumens gegenüber der Norm, was jedoch in keinem Vergleich zu den gewaltig gesteigerten Werten der ordonnanzmäßig ausgerüsteten Maske steht. Dasselbe ergibt sich auch bei der Betrachtung der Atemäquivalente. Die höchsten Werte finden sich stets bei A. o., die zweithöchsten, jedoch wesentlich niedrigeren bei A + Gli. Dabei sind die Unterschiede beim Atemäquivalent für CO_2 wiederum bedeutend höher als die beim Atemäquivalent für O_2.

Um uns aber ein besseres Bild von der Tauglichkeit des neuen Glimmerventils machen zu können, haben wir die während der Ausatmungsphase in den Einatmungsweg gelangende Luft mit Hilfe der in Fig. 5 dargestellten Versuchsanordnung direkt gemessen. In Tab. 4 sind die gefundenen Werte niedergelegt. Sie beweisen eindeutig, daß das Glimmerventilscheibchen einen wesentlichen Fortschritt darstellt, da es durchschnittlich rund 5 mal weniger Luft in den Einatmungsweg gelangen läßt als die ordonnanzmäßige Kunstharzventilscheibe.

Tabelle 3. Das Verhalten der Gaswechselverhältnisse bei freier Atmung (F), bei der Atmung in der Armeemaske mit dem leichten Glimmerventilscheibchen (A + Gli) und bei der Atmung mit der ordonnanzmäßig ausgerüsteten Armeemaske (A. o.)

Versuchspersonen		Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	Fall 8	Fall 9	Fall 10
Sauerstoffverbrauch in ccm/Min.	F	276	282	281	319	218	369	314	351	331	310
	A + Gli	276	262	246	340	326	390	362	355	359	352
	A. o.	366	280	280	333	350	309	309	332	359	320
Kohlensäureausscheidung in ccm/Min.	F	325	281	221	355	312	469	341	461	430	338
	A + Gli	344	260	281	361	262	343	319	347	402	282
	A. o.	372	295	210	347	284	369	334	361	416	296
Respirator Quotient	F	1,2	1,02	1,05	1,11	1,04	1,34	1,0	1,31	1,29	1,09
	A + Gli	1,2	0,95	1,07	1,06	0,8	0,87	0,88	0,97	1,12	0,80
	A o.	1,0	1,05	0,92	1,04	0,81	1,22	1,08	1,08	1,15	0,92
Atemminutenvolumen in ccm	F	7680	7000	6640	9840	6480	14100	7200	10560	15200	8240
	A + Gli	10240	7760	7280	10100	7240	9600	8760	9700	14020	9360
	A. o.	14480	10800	9020	15280	12360	16400	10720	10400	15200	12520
Atemfrequenz	F	16	15	20	14	18	17	9	15	15	14
	A + Gli	17	16	19	15	16	15	13	16	15	15
	A. o.	19	15	18	15	17	14	11	15	15	15
Atemvolumen in ccm	F	480	467	332	706	360	829	800	704	1013	589
	A + Gli	602	485	383	673	453	640	674	606	932	624
	A. o.	762	720	501	1019	727	1170	957	693	1013	835
Atemäquivalent für Sauerstoff	F	2,84	2,50	2,86	3,08	2,17	3,82	2,11	3,01	4,60	2,66
	A + Gli	3,71	2,83	2,96	2,92	2,22	2,46	2,42	2,73	3,90	2,66
	A. o.	3,95	3,84	3,14	4,58	3,53	5,45	3,47	3,13	4,20	3,91
Atemäquivalent für Kohlensäure	F	2,37	2,43	2,21	2,45	2,08	2,84	2,11	2,29	3,55	2,44
	A + Gli	2,97	2,90	2,59	2,79	2,76	2,80	2,75	2,80	3,49	3,32
	A. o.	3,89	3,66	3,47	4,40	4,35	4,44	3,23	2,88	3,65	4,20

Tabelle 4.

Messung der bei der Exspiration infolge der ungenügenden Funktion des Einatmungsventils in den Einatmungsweg zurückströmenden Exspirationsluft. (Versuche mit der Armmeemaske + Glimmerventilscheibchen und der Armmeemaske mit Ordonnanzventilscheibchen).

Versuchspersonen	Versuche mit Ordonnanzscheibe		Versuche mit Glimmerscheibe	
	pro Minute	pro Atemzug	pro Minute	pro Atemzug
Fall 1	2240 ccm	168 ccm	380 ccm	27 ccm
„ 2	2610 „	118 „	400 „	20 „
„ 3	2700 „	180 „	310 „	25 „
„ 4	2590 „	50 „	780 „	21 „
„ 5	1810 „	100 „	430 „	28 „
„ 6	1800 „	100 „	466 „	29 „
„ 7	1670 „	184 „	490 „	33 „
„ 8	1720 „	71 „	600 „	23 „
„ 9	1880 „	144 „	430 „	42 „
„ 10	1850 „	154 „	280 „	27 „
„ 11	2040 „	136 „	290 „	21 „
Durchschn.	2083 ccm	118 ccm	441 ccm	27 ccm

Zusammenfassung.

Wir stellten uns als Aufgabe, die Physiologie der Gasmaskenatmung näher abzuklären, um eventuell auf Grund deren Ergebnisse Verbesserungen vorschlagen zu können.

Die Physiologie der Gasmaskenatmung wurde in der Weise untersucht, indem die Zivil- bezw. Armeemaske in Versuchsreihen an den Knipping'schen Kreislaufstoffwechselapparat angeschlossen wurden. Dabei ergab sich, im Vergleich zu der normalen Atmung, eine wesentliche Verschlechterung der Atemökonomie bei der Zivil- und in noch höherem Maße bei der Armeemaske. Diese Verschlechterung findet ihren Ausdruck in einer Erniedrigung des respirator. Quotienten, einer Verschlechterung der CO_2-ausscheidung, einer durchschnittlichen Steigerung des Atemvolumens und des Atemminutenvolumens

um 35 % bei der Zivilmaske bis maximal 60 % bei der Armeemaske und schließlich in einer Erhöhung des Atemäquivalents für O_2 und besonders für CO_2.

In einer folgenden Versuchsserie werden weitere wichtige Feststellungen gemacht. Die Erhöhung des Atemvolumens und des Atemminutenvolumens beruht nicht auf einem Sauerstoffmangel, da zwischen Luft- und Sauerstoffatmung bei keiner Atemgröße irgendwelche gesetzmäßigen Unterschiede festgestellt werden können. Es ist also allein die verminderte Kohlensäureausscheidung, die sich auswirkt. Die Unterschiede zwischen normaler freier Atmung und Maskenatmung sind wiederum beim Atemäquivalent für CO_2 viel größer als bei entsprechenden Verhältnissen für O_2. Daraus erhellt sich, daß es die CO_2-anreicherung in der Maskenluft, also der schädliche Raum der Maske sein muß, der die schlechte Atemökonomie bedingt. Auch die Maskenatmung ohne Filter geht mit einer schlechten Atemökonomie einher; dem Filter kommt also nur sekundäre Bedeutung als atmungsverschlechternder Faktor zu.

Bei der Untersuchung der Funktion der Atmungsventile zeigt es sich, daß das Ausatmungsventil durch seine Konstruktion als idealfunktionierend bezeichnet werden muß. Durch Aufnahme eines Pneumotachogramms der Luftströmungen im Einatmungsweg der Zivil- bezw. Armeemaske wird festgestellt, daß es bei der Ausatmung im Einatmungsweg zu einer entgegengesetzten Luftströmung kommt, bei der Zivilmaske nur zu Beginn der Ausatmung, bei der Armeemaske während der ganzen Dauer derselben.

Das Einatmungsventil funktioniert also mangelhaft, indem bei der Ausatmung ein Teil der Exspirationsluft durch das schlecht schließende Ventil in den Einatmungsweg gelangt. Dies ist aber nur in liegender Position und bei Ruheatmung der Fall, aus dem Grunde, weil hier der Exspirationsdruck allein nicht genügt, um das Ventilscheibchen aus Kunstharz auf seine Unterlage zu pressen und so den Verschluß herzustellen. Wird forciert geatmet, so ist die Ventilfunktion auch in liegender Stellung besser und in sitzender Position schließt das Ventil auch bei ruhiger Atmung gut. Hier summiert sich näm-

lich zum geringen Atemdruck das Gewicht des Ventilscheibchens. Das Ordonnanzventilscheibchen, das 0,9—0,99 g wiegt, ist also zu schwer; ein Ventilscheibchen, das um einen bestimmten Bruchteil leichter wäre, müßte also auch bei Ruheatmung in liegender Position ideal funktionieren. Unsere Versuche mit verschieden dünnen Modellscheibchen aus Karton haben gezeigt, daß dieses Gewicht bis zu 0,3 g betragen darf. Theoretisch war damit die Frage der Verbesserung der Ventilfunktion und damit der Atemökonomie gelöst.

Ein praktisch verwendbares Ventilscheibchen muß aber formfest, feuchtigkeitsunempfindlich und temperaturbeständig sein, also die physikalischen Qualitäten des Kunstharzscheibchens besitzen und gleichzeitig um $^2/_3$ leichter sein, um als ideal gelten zu können.

Wir machten nun eine Reihe neuer Versuche mit einem Ventilscheibchen aus Glimmer, das die für die praktische Verwendbarkeit notwendigen Eigenschaften aufweist und nur 0,14 g wiegt, also sehr nahe an das Idealgewicht heranreicht. Die Gaswechselverhältnisse werden dadurch weitgehend gebessert: Atemminutenvolumen, Atemvolumen und Atemäquivalent sind bedeutend weniger gesteigert, die Atemökonomie also erheblich besser. Dies wird noch augenfälliger durch die Tatsache, daß das Glimmerscheibchen durchschnittlich rund 5 mal weniger Luft in den Einatmungsweg zurückströmen läßt als das Ordonnanzventilscheibchen.

Rekapitulierend läßt sich also sagen, daß die Bedingungen für den Gasaustausch bei der Gasmaskenatmung in Ruhe und im Liegen wesentlich verschlechtert sind. Dies gilt in besonders hohem Maße für die Armeegasmaske, weniger für die Zivilgasmaske. Schuld an diesen Verhältnissen ist das für die genannten Atmungsbedingungen zu schwere Ventilscheibchen des Einatmungsventils. Durch sein schlechtes Funktionieren gelangt ein Teil der Ausatmungsluft wieder in den Einatmungsweg; es entsteht so ein großer schädlicher Raum. Durch das Anbringen eines viel leichteren Ventilscheibchens können die Verhältnisse weitgehend gebessert werden, und es ist damit der Weg gezeigt, den die Technik zu beschreiten hat, um aus unsern Maskentypen ein ideal funktionierendes Atmungsgerät herzustellen.

Praktische Bedeutung.

Die Gasmaske ist ein wesentlicher Bestandteil der modernen kriegstechnischen Ausrüstung des Soldaten und auch für alle Zivilpersonen unentbehrlich. Die Verbesserung dieser wichtigsten individuellen Schutzeinrichtung gegen die flüchtigen Gaskampfstoffe liegt im Interesse der Wehrmedizin und der allgemeinen Hygiene.

Die heutige Konstruktion der Gasmaske macht die durch die horizontale Rückenlage normalerweise gewährte Erholung des Körpers bis zu einem gewissen Grade illusorisch. Diese Tatsache geht aus unseren Untersuchungen, aus eigener Erfahrung und aus Aeußerungen vieler Soldaten eindeutig hervor.

Durch die beschriebene kleine Veränderung am Einatmungsventil kommt die Gasmaskenatmung annähernd der normalen freien Atmung gleich.

Diese Verbesserung erhöht indirekt die Leistungsfähigkeit der Truppe, indem sie ihr die notwendige körperliche Erholung während Kampfpause und Schlaf ermöglicht.

Insbesondere wird sie sich auch günstig auswirken für die Transporte Verwundeter, Kampfgasvergifteter und Kreislaufgeschädigter.

Eine durch Phosgen und Yperit geschädigte Lunge ist bekanntlich für das Entstehen eines Lungenoedems disponiert. Diese Disposition wird durch verstärkte Atmung und körperliche Anstrengung erhöht, weshalb die Gasverletzten wie Schwerverwundete liegend zurücktransportiert werden. Ist die Gaszone groß, so muß dieser Transport in der Gasmaske erfolgen. Aus den vorliegenden Untersuchungen wissen wir aber, daß gerade unter diesen Umständen der Ventilmechanismus ein ungünstiger ist, und daß das Atemminutenvolumen dadurch stark erhöht wird. Die ungünstige Maskenwirkung macht somit den Effekt des liegenden Rücktransportes nahezu illusorisch. Die Maske versagt in atemphysiologischer Hinsicht gerade in der Situation, in der an sie die höchsten Ansprüche gestellt werden müssen. Die Aenderung des Einatmungsventilscheibchens ist somit unbedingt notwendig.

Literatur.

Anthony: Funktionsprüfung der Atmung. Thieme Leipzig 1937.
Buddelmann G.: Klin. Wschr. I 1937 704.
Gukelberger M.: Sportärztlicher Zentr. k. 1937 Bern Wander AG. Verhandlungen des Vereins für Schweizer Physiologen, Juni 1942.
Hess W. R.: Die Regulierung der Atmung. Leipzig Thieme.
Hofer H.: Der Einfluß der Gasmaskenatmung auf den Kreislauf des Menschen. Diss. Bern 1941.
Ludwig W.: Arb. phys. 10 1939 406.
Moore: J. of. exp. Med. 45 1927 n. Luwig W.
Morawitz und Siebeck: Dtsch. Arch. f. klin. Med. 97 1909 201.
Thiel K., Ruhnau A. und Gerlach K.: Ztschr. f. ges. exp. Med. 1935, 97 1.
Rohrer F.: Schw. Med. Wschr. 1921 943.

Curriculum vitae.

Ich wurde geboren am 10. Februar 1915 in Oberurnen (Kt. Glarus) und besuchte die Schulen meines Heimatkantons. Hierauf bezog ich die Realgymnasialabteilung der Kantonsschule Zug und erlangte im Sommer 1933 die eidg. Maturität. Das Fachstudium durchlief ich an den Universitäten Zürich und Berlin und beschloß es mit dem eidgenössischen Staatsexamen im Frühjahr 1939 an der Universität Zürich.

Seither war ich während längerer Zeit im Aktivdienst als Truppenarzt, als Assistenzarzt an der Kantonalen Krankenanstalt Glarus und als Volontärassistent an der Universitätskinderklinik in Zürich tätig.

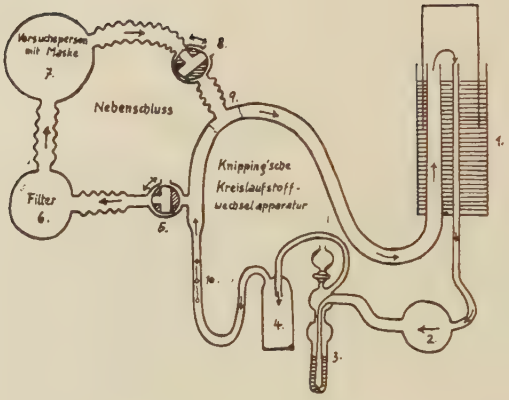


Fig. 1.

Schema der Knipping'schen Kreislaufstoffwechselapparatur mit eingebautem Nebenschluss für Gasmaskenversuche.

1. Spirometer
2. Pumpe
3. Kohlensäureabsorptionsflasche
4. Sicherheitsflasche
5. Patientenanschlusshahn
6. Armee- oder Zivilmasken filter } bei Zivilmaske ohne Zwischenstück
7. Maskenträger
8. 2 Dreiwegehahn
9. T-Rohr
10. Stossdämpfer

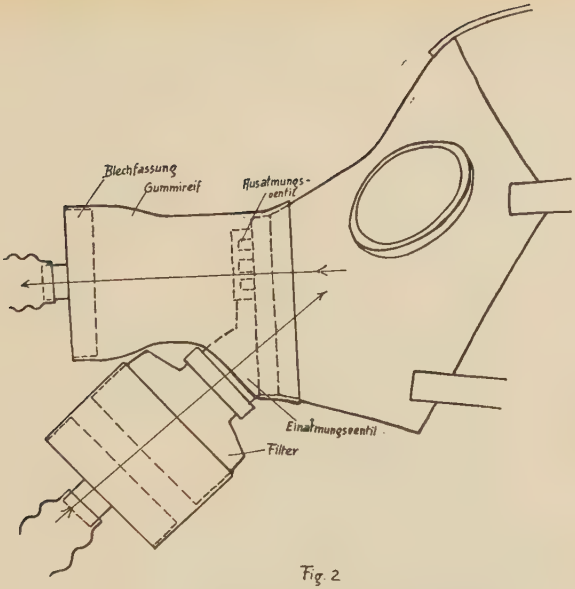


Fig. 2

Schema der für die Gasstoffwechsel-
-untersuchungen umgebauten Zivilgasmaske.

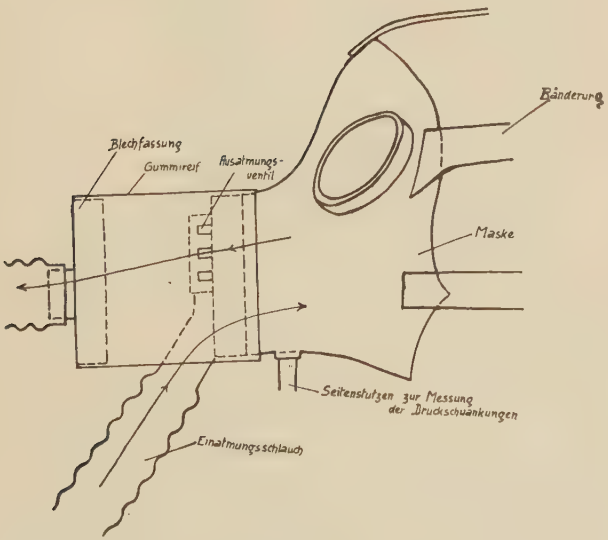


Fig. 3.

Schema der für die Gaswechselversuche
umgeänderten Armeegasmaske.

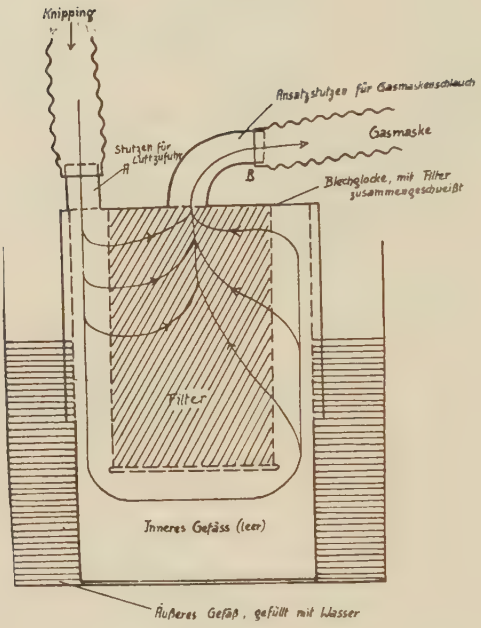


Fig. 4.
Schema des für die Gasstoffwechseluntersuchungen umgebauten Armeefilters.

Der Wassermantel, die Wand des innern Gefäßes und die Wand der Blechglocke schließen das Filter ein, so daß nur noch durch den Stutzen A die Luft zur Maske gelangen kann. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde dieser Stutzen mit dem Patientenhahn des Knippingapparates verbunden

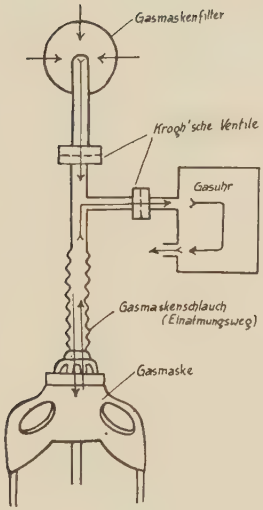
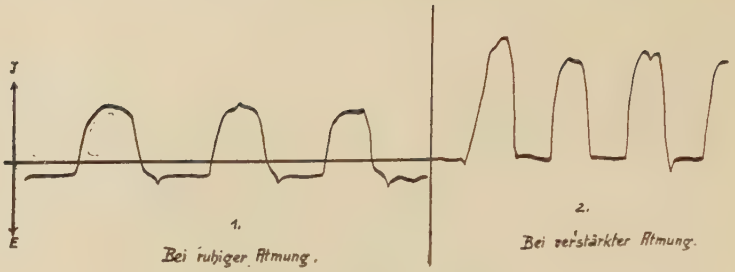


Fig. 5.

Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Messung der durch das Einatmungsventil während der Exspiration in den Einatmungsweg gelangenden Luft.

Fig. 9



Die Funktion des Einatmungsventils der Armeegasmaske im Liegen.

Die Funktion des Einatmungsventils der Armeegasmaske bei verschieden schweren Ventilscheibchen.

Fig. 10

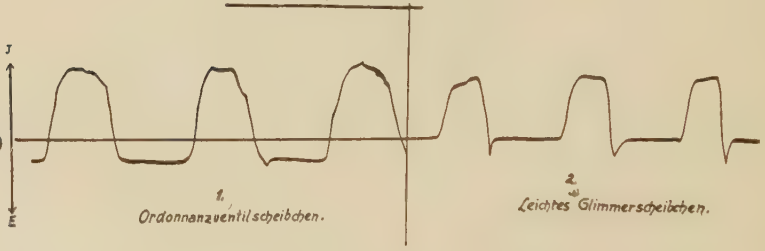
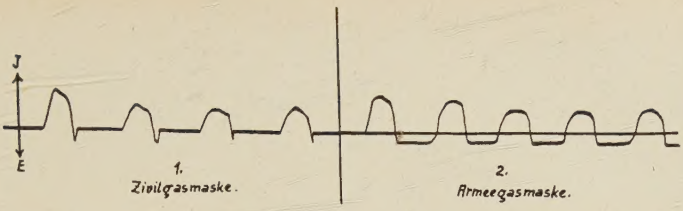


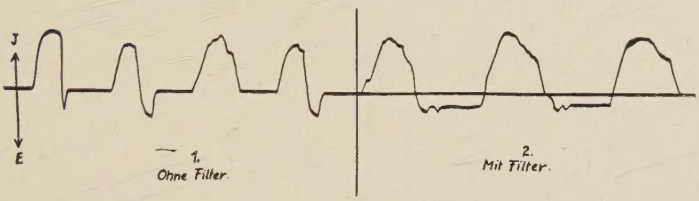
Fig. 6



Die Funktion des Einatmungsventils bei der Zivil- & bei der Armeegasmaske bei ruhiger Atmung im Liegen.

Die Ventilfunktion der Armeegasmaske im Liegen & bei ruhiger Atmung.

Fig. 7



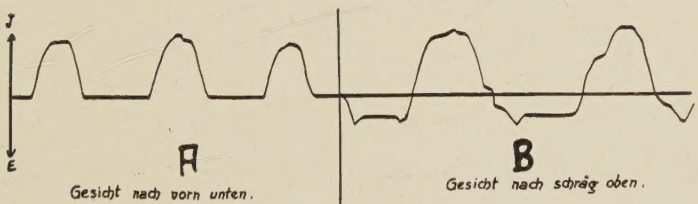
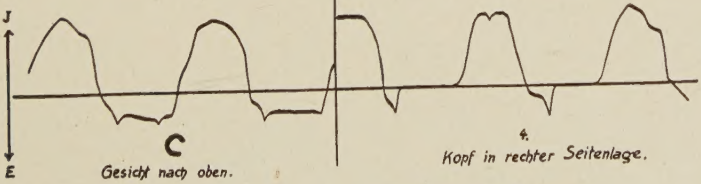


Fig. 8



Die Funktion des Einatmungsventils der Armeegasmaske bei verschiedener Kopfhaltung & ruhiger Atmung.